

بررسی اثر فرآیند پرس در قالب شیار محدود (CGP) بر روی ورق‌های مسی

محمد هنرپیشه^۱

استادیار

فرشاد نظری^۲

دانشجوی دکترا

وحید ابراهیم‌پور^۳

دانشجوی کارشناسی ارشد

در این تحقیق فرآیند پرس در قالب شیار محدود مطالعه شده و تاثیر این فرآیند بر خواص مکانیکی و ریزساختار ورق‌های مسی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی خواص مکانیکی از آزمون‌های تست کشش تک محوره و سختی ویکرز و برای ارزیابی ریزساختارها از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. بررسی نتایج نشان داد با استفاده از فرآیند پرس در قالب شیار محدود، استحکام و سختی نمونه‌ها به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همچنین تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نوری نشان داد فرآیند پرس در قالب شیار محدود بر ریزدانه نمودن ساختار بسیار موثر می‌باشد.

واژه‌های راهنما: تغییر شکل پلاستیک شدید، پرس در قالب شیار محدود، خواص مکانیکی، ریزساختار

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۴ (SPD) جهت ایجاد ساختارهای ریزدانه در فلزات، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. فرآیند پرس در قالب شیار محدود^۵ (CGP)، از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد. خروجی این فرآیند ورق ریزدانه‌ای است که تولید آن با روش‌های دیگر مانند تغییر شکل در کانال زاویه دار^۶ (ECAP) امکان پذیر نمی‌باشد. هرچند که در فرآیند نورد در کانال‌های زاویه دار همسان [۱،۲] نیز میتوان به صورت پیوسته ورق‌های فلزی با ساختار ریزدانه و خواص مکانیک مناسب تولید کرد. در سال (۲۰۰۵) کریشنای و همکارانش [۳،۴] اثرات دمایی اتاق و دمایی تبرید را بر آلیاژهای آلومینیوم کار شده و مس خالص تجاری بررسی کردند و خواص مکانیکی بدست آمده برای نمونه‌ها را مورد مقایسه قرار دادند.

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان honarpishe@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان f_nazari@grad.kashanu.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب vahidebrahimpor@yahoo.com

^۴ Severe Plastic Deformation (SPD)

^۵ Constrained Groove Pressing (CGP)

^۶ Equal Channel Angular Pressing

در سال‌های (۲۰۰۷) و (۲۰۰۹)، پنگ و همکارانش [۵، ۶] نتایج فعالیت‌های خود را در مورد آلیاژهای مس-روی ارائه کردند و در تحقیقات خود با تغییر در نحوه اعمال تغییر شکل، دسترسی به کرنش‌های بالاتر را امکان پذیر نمودند. در سال (۲۰۰۸)، یون و همکارانش [۷] توزیع کرنش در حین فرآیند CGP را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند در ناحیه برش کرنش بدست آمده از شبیه سازی از مقدار متناظر آن در روابط تحلیلی بیشتر است. بعد از آن در سال (۲۰۱۰)، شیردل و همکارانش [۸] مدل المان محدود دو و سه بعدی جهت پیش بینی حرکت مواد در داخل قالب و نیروی پرس ارائه کردند و دریافتند که نتایج بدست آمده از مدل سازی سه بعدی در مقایسه با مدل دوبعدی تطابق بیشتری با نمونه آزمایشگاهی دارد اما مدل سه بعدی آنها تنها شامل پاس اول فرآیند می‌شد و سایر پاس‌ها را پوشش نمی‌داد. در همین سال خدابخشی و همکارانش [۹] فرآیند CGP را بر ورق‌های از فولاد کم کربن بکار بردند که سبب ارتقای خواص مکانیکی این ورق‌ها گردید. در سال (۲۰۱۱)، دانگ و همکارانش [۱۰] تاثیر فرآیند CGP را بر ریز ساختار آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که این فرآیند موجب رسیدن به ساختار فوق ریز دانه خواهد شد. مو و همکارانش [۱۱] نیز اثرات این فرآیند را روی آلیاژ برنج مطالعه کردند و پارامترهای کرنش موثر و سختی را مورد بررسی قرار دادند. در سال (۲۰۱۲)، برهانی و جوانرودی [۱۲] انجام فرآیند CGP با استفاده از بالشتک لاستیکی را به صورتی تجربی و عددی مطالعه کردند.

در همین سال، خاکباز و کاظمی‌نژاد [۱۳، ۱۴] خواص مکانیکی، حساسیت به نرخ کرنش و رفتار شکست را روی ورق‌های آلومینیوم CGP شده بررسی کردند. در سال (۲۰۱۳)، سانیل و همکارانش [۱۵] ریزساختار آلیاژ منیزیم AZ31 را تحت عملیات^۱ GP مورد بررسی قرار دادند. همچنین خدابخشی و همکارانش [۱۶] توانستند با تغییر در الگوی انجام فرآیند بر روی فولاد کم کربن به بهبود بیشتر خواص توسط فرآیند CGP دست یابند. در سال (۲۰۱۴)، ابراهیمی و همکارانش [۱۷] خواص سایشی ورق‌های CGP شده از جنس برنج را بررسی کردند. وانگ و همکارانش [۱۸] تاثیر اصطکاک در فرآیند CGP را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که استفاده از روانکار امکان انجام پاس‌های بیشتر فرآیند و رسیدن به ساختارهایی با اندازه دانه کوچکتر را فراهم می‌کند همچنین آنها در سال (۲۰۱۵) پارامترهای هندسی قالب را بر روی ورق‌هایی از جنس نیکل بررسی کردند [۱۹].

با توجه به موارد بیان شده هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر فرآیند CGP بر خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق‌های مسی با ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. بدین منظور تغییر طول نسبی، تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌ها مطالعه شد و پروفیل تغییرات سختی در سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. همچنین ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته و اندازه دانه در مراحل مختلف فرآیند بدست آمده است. همچنین جهت بررسی میزان یکنواختی سختی از پارامتر^۲ I.F. استفاده شد.

^۱ Groove Pressing (CGP)

^۲ Inhomogeneity Factor

۲- مواد و روش تحقیق

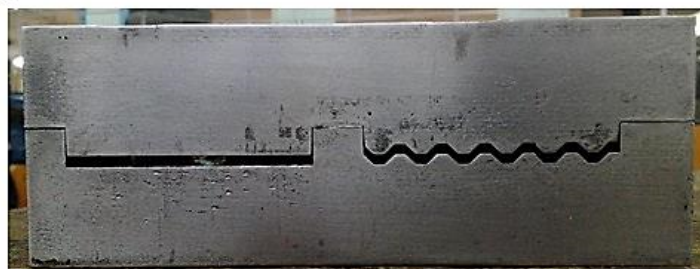
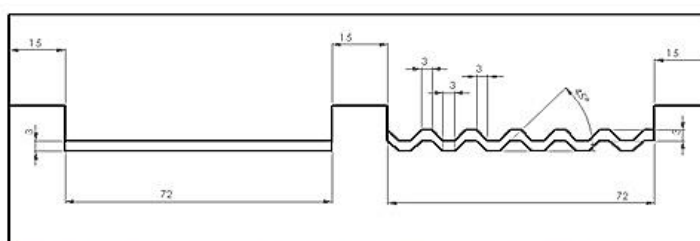
در تحقیق حاضر از ورق‌های مس خالص تجاری که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) بیان شده، استفاده شده است. نمونه‌ها در ابعاد $72\text{mm} \times 52\text{mm} \times 3\text{mm}$ تهیه شده و سپس جهت دستیابی به میکروساختار یکنواخت‌تر و شکل پذیرتر، در دمای 650°C درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت آنیل شده‌اند. روی نمونه‌های آماده شده تا ۱۲ مرتبه عملیات پرسکاری انجام گرفته که هر ۴ مرتبه عملیات پرسکاری یک پاس فرآیند CGP را تشکیل داده است. در نتیجه انجام فرآیند CGP تا ۳ پاس، کرنشی معادل $3/48$ بر نمونه‌ها اعمال گردید. شکل (۱) نمونه مسی را پس از اولین مرتبه پرسکاری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه طراحی قالب و ابعاد شیپارها به ضخامت ورق مورد استفاده بستگی دارد، قالب مورد نظر برای ورق‌هایی به ضخامت ۳ میلیمتر طراحی و ساخته شد. جنس قالب از فولاد CK60 بوده و برای رسیدن به سختی و استحکام مناسب عملیات حرارتی گردید. شکل (۲) هندسه و ابعاد قالب و همچنین قالب ساخته شده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مس خالص تجاری مورد استفاده

Cu	Zn	Fe	Co	Cd	Mn	Al	Pb	Sn	Si	Ni
۹۸/۵۱	۰/۷۷۷	۰/۱۲۹	۰/۰۵۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۶۴	<۰/۰۱	۰/۴۸۳	۰/۰۱۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵



شکل ۱- نمونه مسی پس از یک پاس عملیات CGP



شکل ۲- ابعاد و تصویر قالب برای نمونه‌های به ضخامت ۳ میلیمتر

پس از انجام فرآیند پرسکاری در قالب شیار محدود، نمونه‌های آزمون کشش از ورق‌های تغییر فرم یافته تهیه شده به این صورت که طول سنج‌ها در جهت طول ورق انتخاب شده و بر اساس استاندارد ASTM E8M آماده گردیده‌اند. همه آزمون‌های کشش در دمای اتاق با استفاده از دستگاه آزمون کشش اینسترون انجام شده و از نرخ کرنش اولیه $10^{-3} \times 5$ (یا سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه) استفاده شده است. جهت اطمینان از صحت نتایج، ۲ مرتبه آزمون کشش برای هر پاس پرسکاری، انجام شد. شکل (۳) نمونه آماده شده برای انجام تست کشش را نشان می‌دهد. جهت بررسی تغییرات سختی در نمونه‌ها، آزمون سختی ویکرز انجام گرفت. براساس شکل (۴)، اندازه‌گیری‌های سختی بر روی خطوط موازی با لبه A که با فاصله مساوی ۵ میلی‌متر از هم قرار دارند انجام شده است. مقادیر سختی از میانگین حداقل ۵ مرتبه اندازه‌گیری سختی در امتداد این خطوط در موقعیت‌های مختلف بدست آمده است.

اعمال کرنش شدید پلاستیک، موجب افزایش و حرکت نابجائی‌ها و در نهایت تشکیل مرزدانه‌های فرعی و ریزدانه شدن ساختار می‌گردد. میزان ریزدانه شدن، با مقدار کرنش اعمال شده در ارتباط است. به منظور بررسی چگونگی تاثیر فرآیند CGP بر اندازه دانه، تصاویری از ریزساختار قطعات توسط میکروسکوپ نوری تهیه شده است. برای مطالعه ریزساختار، نمونه‌های متالوگرافی شده با اندازه‌های کوچک از وسط ورق تهیه شده و در راستای ضخامت مورد بررسی قرار گرفتند. برای این کار قطعات در کنار هم مانت شده و بعد از سنباده زنی با سنباده‌های ۸۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰، توسط دستگاه پولیش با سرعت ۵۰۰ rpm به وسیله نمد و الکل پولیش نهایی گردیدند. از محلول کلر (Keller) با ترکیب ۲ میلی لیتر HF، ۳ میلی لیتر HCL، ۲۰ میلی لیتر HNO₃ و در ۱۷۵ ml آب مقطر، به منظور اچ الکتروشیمیایی نمونه‌ها استفاده شد. در شکل (۵) نمونه‌های مانت شده مسی جهت متالوگرافی نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه مسی تست کشش



شکل ۴- موقعیت‌های تست سختی



شکل ۵- نمونه‌های مسی آماده شده برای عکس‌برداری نوری

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییر طول نسبی و استحکام

نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌ها در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین افزایش استحکام کششی و استحکام تسلیم در پاس اول فرآیند اتفاق می‌افتد. به طوری که استحکام کششی نمونه‌ها از ۱۴۰ مگاپاسگال در حالت آنیل شده به ۲۲۰ مگاپاسگال در پاس اول و تنش تسلیم از ۴۹ مگاپاسگال به ۸۹ مگاپاسگال افزایش یافته است. سپس در پاس‌های بعدی افزایش استحکام با شیب کمتری ادامه می‌یابد اما استحکام تسلیم در پاس‌های بعدی نسبت به پاس اول کاهش یافته و در پاس سوم به مقدار ۶۱/۳ مگاپاسگال می‌رسد که در شکل (۷) نمایش داده شده است.

افزایش استحکام نهایی و استحکام تسلیم نسبت به حالت آنیل شده ناشی از دو عامل کار سختی و ریز شدن دانه‌ها می‌باشد [۱،۳،۹،۱۲،۱۳،۱۶]. به دلیل انجام کار سرد روی نمونه‌ها، نابجایی تولید شده و هر چه مقدار کرنش اعمالی افزایش یابد، چگالی این نابجایی‌ها افزایش یافته و برخورد نابجایی‌ها با یکدیگر بیشتر می‌شود. از طرفی چون بین چگالی نابجایی و استحکام رابطه $\sigma = M\alpha\mu b\sqrt{\rho}$ برقرار است (ρ چگالی نابجایی‌ها می‌باشد)، بنابراین افزایش چگالی نابجایی‌ها سبب افزایش استحکام خواهد شد [۲۱،۲۰]. اعمال کرنش شدید باعث ایجاد مرزهای نابجایی و تقسیم دانه‌های اولیه به واحدهای کوچک‌تر زیر دانه می‌شود. با افزایش کرنش اعمالی، فاصله مرزها کوچک‌تر و در نتیجه یک ریزساختار با دانه‌بندی بسیار ریز تشکیل می‌شود که سبب افزایش استحکام می‌گردد [۴،۱۱،۲۲].

با توجه به نمودار در پاس دوم، استحکام تسلیم نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش استحکام را می‌توان به دو عامل نسبت داد. عامل اصلی در کاهش استحکام تشکیل میکرو ترک‌ها در ساختار می‌باشد. میکرو ترک‌ها در طول فرآیند شکل‌دهی در سطح ورق ایجاد می‌شوند و در اثر تغییر شکل ورق افزایش یافته و سبب کاهش استحکام تسلیم می‌گردند [۳،۴،۱۴،۱۸،۱۹]. به همین دلیل شرایط سطحی از پارامترهای مورد اهمیت می‌باشد و استفاده از روانکارها می‌تواند با کاهش میکرو ترک‌ها، افت استحکام تسلیم را به پاس‌ها بالاتر انتقال دهد [۲۲،۱۸].

عامل دیگر در کاهش استحکام تسلیم این است که در پاس اول، انرژی درونی ماده پایین است و سرعت فرآیندهای صعود و لغزش متقاطع که باعث کاهش چگالی ناهنجاریها می‌شوند کم بوده و بنابراین فعالیت مکانیزم‌هایی که باعث تولید ناهنجاریها می‌شوند بیشتر است [۲۳، ۱۰]. اما با ادامه تغییر شکل (پاس دوم)، سرعت افزایش چگالی ناهنجاریها کاهش یافته تا اینکه چگالی ناهنجاریها به حد اشباع می‌رسد. با ادامه تغییر شکل و در کرنش‌های بیشتر، چگالی ناهنجاریها اندکی کاهش می‌یابد که به دلیل بالا بودن سرعت فرآیندهای مصرف ناهنجاری‌هاست، که بازایی دینامیکی نامیده می‌شوند [۲۴، ۲۱، ۱۴، ۱۰، ۳].

افزایش استحکام ماده سبب کاهش میزان انعطاف پذیری فلز و به عبارتی کاهش مقدار تغییر طول نسبی آن می‌شود که بررسی نمودار تنش-کرنش این موضوع را نشان می‌دهد. ورق آنیل شده دارای ازدیاد طول نسبی ۳۶٪ بوده که بعد از انجام فرآیند CGP دیده شد که ازدیاد طول نسبی در پاس سوم به ۴/۸٪ کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد، ناپایداری و گلوئی شدن در نمونه‌های CGP شده زودتر آغاز می‌شود و این موضوع نشان دهنده نرخ کارسختی پایین (n کوچک در معادله Hollomon) می‌باشد [۹]. همچنین افزایش تغییر شکل ناهمگن در نمونه های CGP شده نسبت به نمونه پایه، نشان دهنده افزایش حساسیت ماده به نرخ کرنش (m بزرگ در رابطه Hollomon) می‌باشد که به دلیل ریزدانه شدن ساختار و تمایل ماده به رفتار سوپر پلاستیک اتفاق می‌افتد [۹].

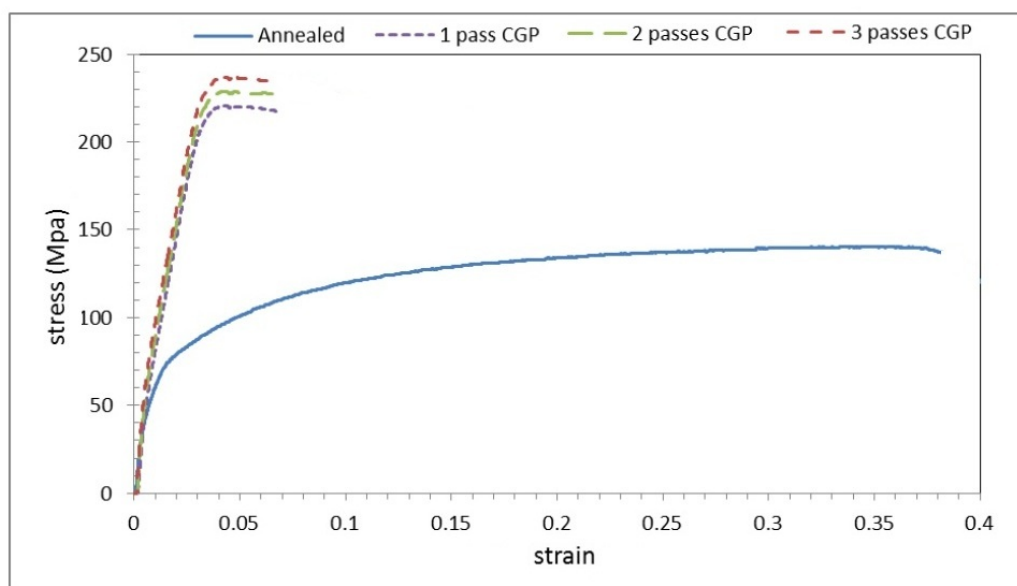
۳-۲-۳- سختی

شکل (۸) سختی نمونه‌های CGP شده بر حسب تعداد پاس‌های انجام شده را نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد پاس‌ها به دلیل کار سخت شدن، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که سختی نمونه‌ی آنیل شده ۵۰ ویکرز بوده که این مقدار در پاس اول به ۸۰، در پاس دوم به ۸۴ و در پاس سوم به ۸۶ ویکرز رسیده است. البته روند افزایش سختی در پاس اول بسیار زیاد بوده و با افزایش پاس این روند کاهش یافته است که همانطور که قبلاً اشاره شد به دلیل کاهش نرخ کار سختی در پاس‌های بالا می‌باشد [۹، ۱۲].

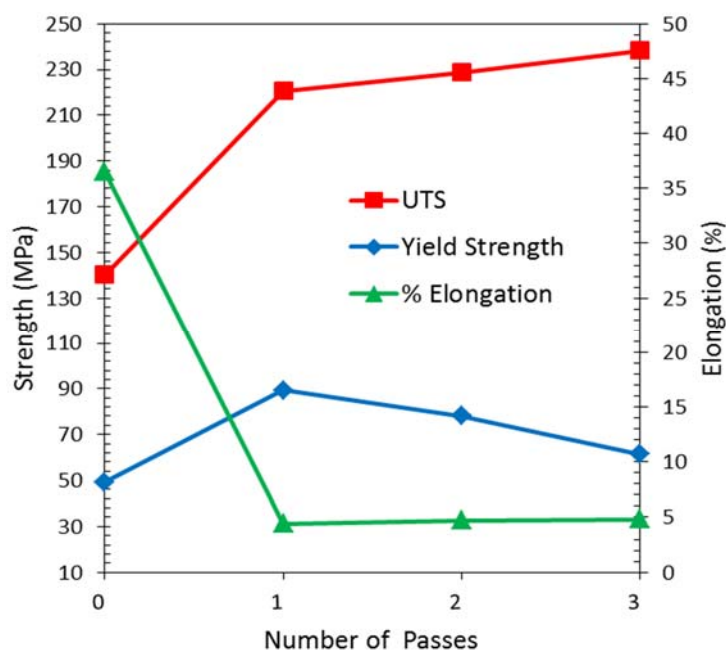
در شکل (۹) سختی نمونه‌های CGP شده نسبت به فاصله طولی از لبه نمونه نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند CGP، میزان یکنواختی سختی یا یکنواختی خواص مکانیکی افزایش یافته است. جهت بررسی میزان یکنواختی سختی از پارامتر I.F. استفاده شده است که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد [۹]:

$$I.F. = \frac{1}{H} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n-1}} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه n تعداد نقاطی است که سختی آنها اندازه گیری شده، H_i مقادیر سختی اندازه گیری شده بوده و \bar{H} مقدار میانگین سختی می‌باشد. مقادیر کمتر I.F. نشان دهنده یکنواختی بیشتر در ساختار می‌باشد. شکل (۱۰) مقادیر یکنواختی سختی را بر حسب تعداد پاس نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودار تنش کرنش مهندسی نمونه‌های مسی، در پاس‌های مختلف فرآیند

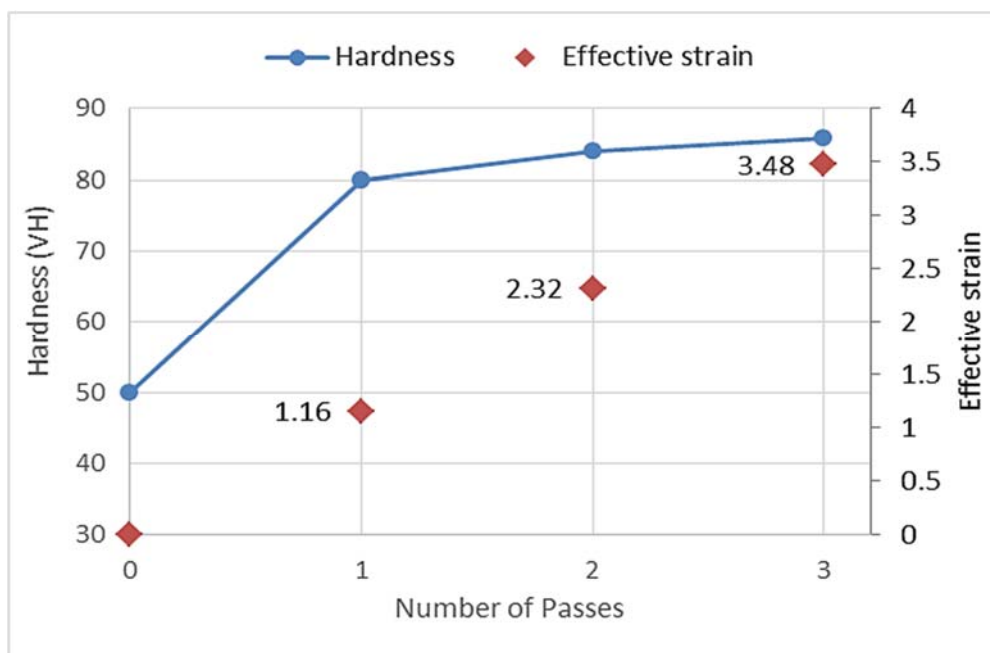


شکل ۷- نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌های مسی (آنیل شده و CGP شده)

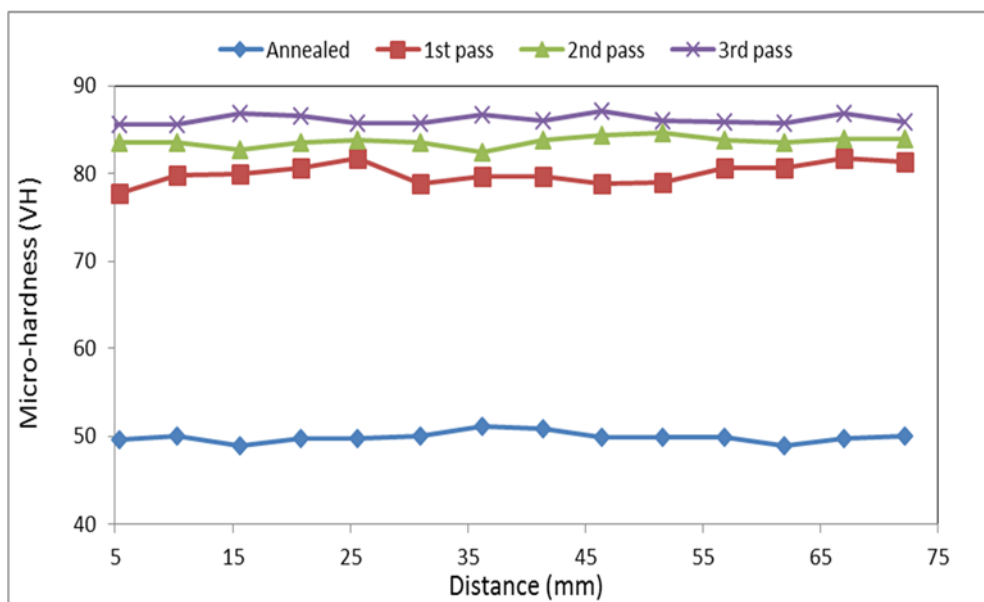
۳-۳- ریزساختار

مهم‌ترین تاثیر فرآیند CGP و به طور کلی فرآیندهای SPD^۱، کاهش اندازه دانه‌بندی فلزات تا ابعاد بسیار ریز یا نانومتری است. تصویر ریزساختار ورق‌های مسی آنیل شده و CGP شده با استفاده از میکروسکوپ نوری بدست آمده است. شکل (A) (۱۱) ورق آنیل شده با ریزساختاری با متوسط اندازه دانه تقریباً ۶۰ میکرون را نشان می‌دهد. مطابق شکل (C) (۱۱) بعد از ۳ پاس فرآیند CGP اندازه متوسط دانه‌ها به حدود تقریباً ۱ میکرون کاهش یافته است که سبب بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی شده است.

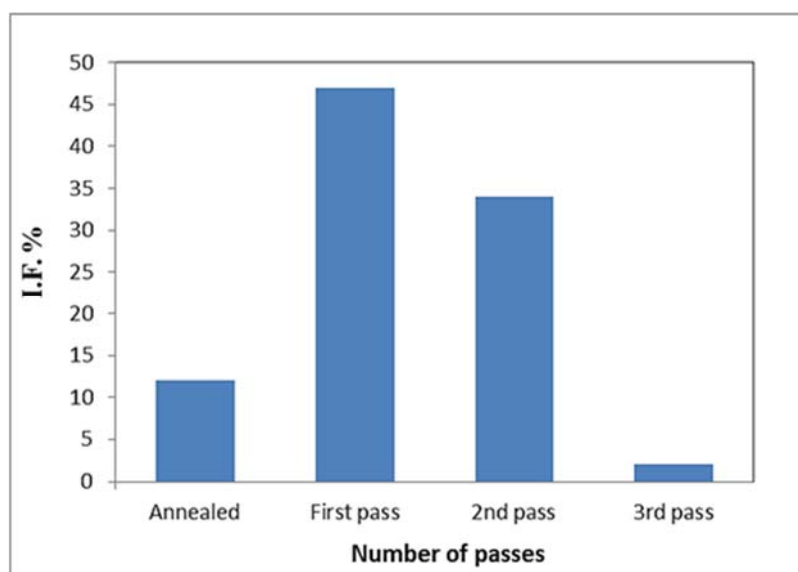
^۱ Severe Plastic Deformation



شکل ۸- تغییرات سختی در نمونه‌ها بر حسب پاس‌های فرآیند



شکل ۹- تغییرات سختی در امتداد طولی نمونه‌ها

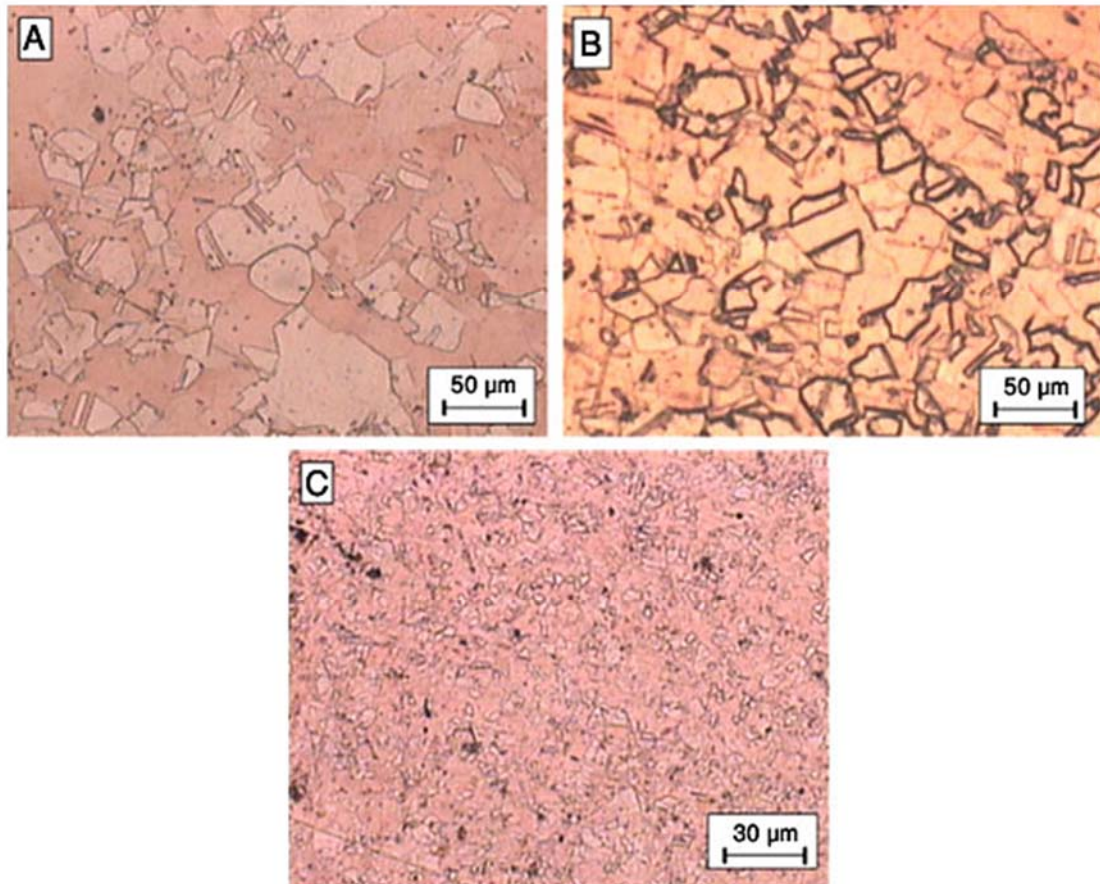


شکل ۱۰- یکنواختی سختی بر حسب تعداد پاس

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر فرایند CGP بر خواص مکانیکی و ریزساختار ورق‌های مسی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از آزمون کشش تک محوره، سختی ویکرز و میکروسکوپ نوری بهره گرفته شد که نتایج آن به صورت خلاصه در زیر بیان شده است.

- فرآیند CGP استحکام کششی و استحکام تسلیم را افزایش می‌دهد که بیشترین رشد در پاس اول فرآیند اتفاق می‌افتد و در پاس‌های بعدی افزایش استحکام نهایی با شیب کمتری ادامه می‌یابد.
- فرآیند CGP سبب کاهش مقدار تغییر طول نسبی ماده شده به طوری که ورق آنیل شده دارای ازدیاد طول نسبی ۳۶٪ بوده و بعد از انجام فرآیند CGP، ازدیاد طول نسبی در پاس سوم به ۴/۸٪ کاهش یافت.
- ناپایداری و گلویی شدن در نمونه‌های CGP شده زودتر آغاز می‌شود و این موضوع نشان دهنده نرخ کارسختی پایین (n کوچک در معادله Hollomon) می‌باشد. همچنین افزایش تغییر شکل ناهمگن در نمونه‌های CGP شده نسبت به نمونه پایه، نشان دهنده افزایش حساسیت ماده به نرخ کرنش (m بزرگ در رابطه Hollomon) است.
- با انجام فرآیند CGP سختی نمونه‌ها افزایش یافته و با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند CGP، میزان یکنواختی تغییر شکل و خواص مکانیکی بیشتر می‌شود.
- با توجه به تصاویر تهیه شده از ریزساختار، فرآیند CGP سبب کاهش اندازه دانه می‌گردد به طوری که اندازه دانه در نمونه مس آنیل شده از ۶۰ میکرون به ۱ میکرون در نمونه با ۳ پاس عملیات CGP کاهش یافته است.



شکل ۱۱- ریزساختار نمونه‌های (A) آنیل شده (B) ۱ پاس CGP شده (C) ۳ پاس CGP شده

مراجع

- [1] Honarpisheh, M., Haghghat, E., and Kotobi, M., "Investigation of Residual Stress and Mechanical Properties of Equal Channel Angular Rolled St12 Strips", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, <https://doi.org/10.1177/1464420716652436>, (2016).
- [2] Kotobi, M., and Honarpisheh, M., "Uncertainty Analysis of Residual Stresses Measured by Slitting Method in Equal-channel Angular Rolled Al-1060 Strips", The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 52, No. 2, pp. 83-92, (2017).
- [3] Lee, J.W., and Park, J.J., "Numerical and Experimental Investigations of Constrained Groove Pressing and Rolling for Grain Refinement", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, pp. 208-213, (2002).
- [4] Krishnaiah, A., Chakkingal, U., and Venugopal, P., "Production of Ultrafine Grain Sizes in Aluminium Sheets by Severe Plastic Deformation using the Technique of Groove Pressing", Scripta Materialia, Vol. 52, pp. 1229-1233, (2005)

- [5] Krishnaiah, A., Chakkingal, U., and Venugopal, P., "Applicability of the Groove Pressing Technique for Grain Refinement in Commercial Purity Copper", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 410–411, pp. 337–340, (2005).
- [6] Peng, K., Su, L., Shaw, L.L., and Qian, K.W., "Grain Refinement and Crack Prevention in Constrained Groove Pressing of Two Phase Cu-Zn Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 57, pp. 987-990, (2007).
- [7] Peng, K., Zhanga, Y. L., Shaw, L., and Qian, K.W., "Microstructure Dependence of a Cu–38Zn Alloy on Processing Conditions of Constrained Groove Pressing", *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 5543–5553, (2009).
- [8] Yoon, S.C., Krishnaiah, A., Chakkingal, U., and Kim, H.S., "Severe Plastic Deformation and Strain Localization in Groove Pressing", *Computational Materials Science*, Vol. 43, pp. 641-645, (2008).
- [9] Shirdel, A., Khajeh, A., and Moshksar, M.M., "Experimental and Finite Element Investigation of Semi-constrained Groove Pressing Process", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 946-950, (2010).
- [10] Khodabakhshi, F., Kazeminezhad, M., and Kokabi, A.H., "Constrained Groove Pressing of Low Carbon Steel: Nano-structure and Mechanical Properties", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 4043–4049, (2010).
- [11] Xiaolei, Dong, B. Y., and Zhihao, M., "Grain Refinement in Constrained Groove Pressing of 7050 Aluminum Alloy", *Advanced Materials Research*, Vol. 189-193, pp. 2823-2826, (2011).
- [12] Mou, X., Peng, K., Zeng, J., Shaw, L., and Qian, K.W., "The Influence of the Equivalent Strain on the Microstructure and Hardness of H62 Brass Subjected to Multi-cycle Constrained Groove Pressing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp. 590–596, (2011).
- [13] Borhani, M., and Djavanroodi, F., "Rubber Pad-constrained Groove Pressing Process: Experimental and Finite Element Investigation", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 546, pp. 1–7, (2012).
- [14] Khakbaz, F., and Kazeminezhad, M., "Work Hardening and Mechanical Properties of Severely Deformed AA3003 by Constrained Groove Pressing", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, pp. 20–25, (2012).
- [15] Khakbaz, F., and Kazeminezhad, M., "Strain Rate Sensitivity and Fracture Behavior of Severely Deformed Al–Mn Alloy Sheets", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 532, pp. 26– 30, (2012).
- [16] Ratna Sunil, B., Arun Anil Kumar, Sampath Kumar, T.S., and Uday Chakkingal, "Role of Biomineralization on the Degradation of Fine Grained AZ31 Magnesium Alloy Processed by Groove Pressing", *Materials Science and Engineering C*, Vol. 33, pp. 1607–1615, (2013).

- [17] Khodabakhshi, F., Abbaszadeh, M., Eskandari, H., and Mohebpour, S.R., "Application of CGP-cross Route Process for Microstructure Refinement and Mechanical Properties Improvement in Steel Sheets", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 4, pp. 533-541, (2013).
- [18] Ebrahimi, M., Attarilar, Sh., Djavanroodi, F., Gode, C., and Kim, H.S., "Wear Properties of Brass Samples Subjected to Constrained Groove Pressing Process", *Materials and Design*, Vol. 63, pp. 531–537, (2014).
- [19] Zongshen, W., Yanjin, G., and Chongkai, Z., "Effects of Friction on Constrained Groove Pressing of Pure Al Sheets", *Advanced Materials Research* Vol. 926-930, pp. 81-84, (2014).
- [20] Zong-Shen, W., Yan-Jin, G., Guang-Chun, W., and Chong-Kai, Z., "Influences of Die Structure on Constrained Groove Pressing of Commercially Pure Ni Sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 215, pp. 205–218, (2015).
- [21] Kazeminezhad, M., and Hosseini, E., "Optimum Groove Pressing Die Design to Achieve Desirable Severely Plastic Deformed Sheets", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 94–103, (2010).
- [22] Hosseini, E., Kazeminezhad, M., Mani, A., and Rafizadeh, E., "On the Evolution of Flow Stress during Constrained Groove Pressing of Pure Copper Sheet", *Computational Materials Science*, Vol. 45, pp. 855–859, (2009).
- [23] Zhu, Y.T., Lowe, T.C., and Langdon, T.G., "Performance and Applications of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation", *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 825-830, (2004).
- [24] Luo-xing, L.I., Guan Wang, Jie, L.I.U., and Zai-qi, Y., "Flow Softening Behavior and Microstructure Evolution of Al-5Zn-2Mg Aluminum Alloy during Dynamic Recovery", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, pp. 42–48, (2014).
- [25] Khodabakhshi, F., and Kazeminezhad, M., "The Effect of Constrained Groove Pressing on Grain Size, Dislocation Density and Electrical Resistivity of Low Carbon Steel", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3280–3286, (2011).

Abstract

In the last decade, the importance of severe plastic deformation techniques is extensively recognized for all researchers in the materials science field. In this research, one of the severe plastic deformation (SPD) methods known as constrained groove pressing (CGP) has been studied. This method is using to create sheets with ultrafine grain structure. Effects of CGP process have been investigated on mechanical properties and microstructure of Copper sheets. Tensile test, Vickers micro hardness and optical microscopy were used to examine mechanical and microstructure properties. The results show, by the CGP process, strength and hardness increase, significantly. After the first pass, the yield and tensile strength increased %57 and %82, respectively. Hardness results illustrated by increasing CGP passes, uniformity of strain increased. The obtained images from optical microscopy demonstrated that the CGP process is very effective for achieving to ultrafine grain structures. Also, the inhomogeneity factor (I. F) was studied to investigate the homogeneity of the hardness.